



## Experimental study of the effect of transverse distance between the rectangular piers on local scour around them

Seyyed Mojtaba Hosseini Matin<sup>1</sup> , Mohammad Bahrami Yarahmadi<sup>2✉</sup> , Mehdi Ghomeshi<sup>3</sup> ,  
Mahmood Shafaei Bejestan<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> MSc. student of Civil Engineering (Water & Hydraulic Structures), Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail : [mojtabahosseiniartin1997@gmail.com](mailto:mojtabahosseiniartin1997@gmail.com)

<sup>2</sup> Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail : [m.bahrami@scu.ac.ir](mailto:m.bahrami@scu.ac.ir)

<sup>3</sup> Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail : [ghomeshi@scu.ac.ir](mailto:ghomeshi@scu.ac.ir)

<sup>4</sup> Professor, Department of Water Structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail : [m\\_shafai@yahoo.com](mailto:m_shafai@yahoo.com)

### ABSTRACT

The main cause of the destruction of many bridges built on rivers is local scour around their piers, especially during floods. The failure and destruction of bridges, in addition to financial and human losses, also cuts the communication path to flood-affected areas that need assistance and doubles the damages. The present study examined the effect of transverse distance between vertical rectangular piers in the pier group on the local scour around them in a straight channel under different hydraulic conditions (Froude numbers 0.160, 0.186, 0.211, and 0.245). The piers used in this study were rectangular 2.5 cm wide and 3.5 cm long. The longitudinal distance between the piers was fixed and 4 times the width of the pier (10 cm), and the transverse distance between the piers was 1, 3, 5, and 8 times the width of the pier, which were equivalent to 2.5, 7.5, 12.5 and 20 cm. The results showed that with an increase in the transverse distance between the piers, the maximum scour depth first began to decrease and reached the minimum value at a distance three times the width of the pier, then with an increase in the transverse distance, the maximum scour depth increased and reached the maximum at a distance of 8 times the width of the pier. The maximum scour depth at a distance of 8 times the width of the pier was obtained on average 34% more than the distance of 3 times the width of the pier.

**Keywords:** Local scour, Rectangular pier group, Transverse distance, River engineering.

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 28 February 2024 Revised: 21 May 2024 Accepted: 05 June 2024 ePublished: 21 June 2024

### 1. Introduction

Bridges are built to connect the two sides of rivers. As a result of the flows hitting the piers of bridges, scour occurs around them, especially during floods. Sometimes the degree of the score is so high that it destroys the pier and eventually the bridge. Every year, many bridges around the world are destroyed due to scour around their piers and abutments (Ghodsi et al. 2015). Various studies have addressed the scour formed around bridge piers, mostly single piers, and the factors affecting it. However, some studies have examined pier groups, but the number of such studies is smaller than the studies conducted on single piers. Cylindrical piers are mostly used in the mentioned studies. A few studies have addressed the effect of the transverse distance between the piers in the group of piers, especially rectangular piers. The present study hypothesized that the changes in the transverse distance between the piers are effective on the intensity of scour around them in the pier group. To this end, the present study sought to investigate the effect of changes in the transverse distance between rectangular piers on the local scour around them in the group of piers with a 2×2 arrangement.

### 2. Methodology

The experiments of this study were carried out in Flume with a rectangular cross-section and length and width equal to 6 and 0.73 meters, respectively. The sediments used in this study were sand with a relative density of 2.65. The average size of the sediment particles ( $d_{50}$ ) was equal to 0.73 mm and the standard deviation coefficient of bed sediments ( $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ ) was equal to 1.22, which indicates the uniformity of the sediment grading. The piers used in this study were rectangular 2.5 cm wide and 3.5 cm long. In all experiments, the pier group was used with a 2×2 arrangement. The longitudinal distance between the piers was fixed and 4 times the width of the pier (10 cm). The transverse distance between the piers was chosen as 1, 3, 5, and 8 times the width of the pier equivalent to 2.5, 7.5, 12.5, and 20 cm. In this study, the flow depth was equal to 14 cm with discharge rates of 19, 22, 25, and 29 L/s (Froude numbers 0.16, 0.186, 0.211, and 0.245). All the experiments were conducted in clear water.

### 3. Results and discussion

The scour rate around the piers is a function of the flow Froude number, the distance of the piers from each other, and the row of the pier placement (the first or second row). With an increase in the Froude number, the scour depth also increased due to an increase in the strength of the erosive eddies and the bed shear stress around the piers.

In all the experiments, the maximum depth of the scour hole was observed around the piers of the first row. Figure 1 displays the trend of changes in the maximum relative scour depth ( $ds_1/w$ ) for different distances and Froude numbers. As can be seen, with an increase in the transverse distance between the piers, the maximum scour depth first started a downward trend and reached the minimum value at a distance three times the width of the pier, then the trend of changes in the maximum scour depth increased and reached its maximum value at a distance of 8 times the pier width. The data showed that the maximum scour depth at a distance of 8 times the width of the pier with Froude numbers 0.16, 0.186, 0.211, and 0.245, was 39.5, 35, 35, and 28% greater than the distance 3 times the pier width, 37, 37, 32 and 14% greater than the distance 5 times the pier width, and 30, 25, 20 and 10% greater than the distance 1 time the pier width.

In all the experiments, the maximum scour depth around the piers in the first row was greater than that of the piers in the second row. The data revealed that the maximum scour depth around the piers in the second row at transverse distances of 1, 3, 5, and 8 times the pier width was on average 35, 48, 40, and 42% smaller than the maximum scour depth around the piers in the first row.

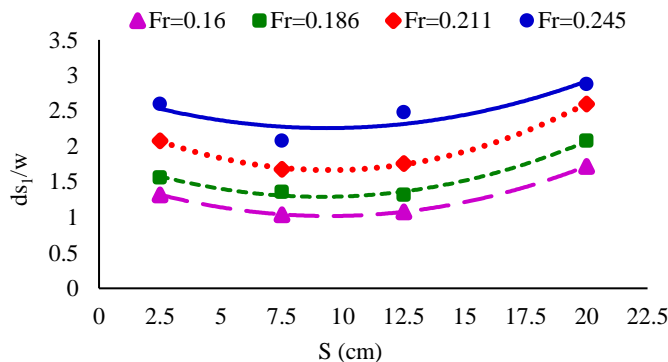


Figure 1. The changes in the maximum scour depth for different transverse distances between piers

### 4. Conclusions

This study examined the effect of the transverse distance between the rectangular piers in the pier group with a 2x2 arrangement on the local scour around the piers under different hydraulic conditions. The results showed that with an increase in the transverse distance between the piers, the maximum scour depth first began to decrease and reached the minimum value at a distance 3 times the width of the pier. Then, with an increase in the transverse distance, the maximum scour depth increased and reached the maximum at a distance of 8 times the width of the pier. Overall, the highest and lowest scour rates occurred at distances of 3 and 8 times the pier width, respectively. In addition to the depth, similar findings were also observed for the length and width of the scour hole. In other words, the maximum length and width of the scour hole were observed at a distance of 8 times the width of the pier. The data revealed that the maximum scour depth at a distance of 8 times the width of the base was on average 34, 30, and 21% greater than the distances of 3, 5, and 1 times the pier width, respectively.

### 5. References

Ghods, H., Khanjani, M. J., & Beheshti, A. A. (2015). Experimental investigation of local scour around a complex bridge pier. *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, 2(3), 47-55. [https://journals.sru.ac.ir/article\\_337.html](https://journals.sru.ac.ir/article_337.html) [In Persian]

### 6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

### 7. Acknowledgments

We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support (SCU.WH1402.31373).

**Cite this article:** Hosseini Matin, S.M., Bahrami Yarahmadi, M., Ghomeshi, M., & Shafaei Bejestan, Mahmood. (2024). Experimental study of the effect of transverse distance between the rectangular piers on local scour around them, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), 43-58. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10621.1123





## بررسی آزمایشگاهی اثر فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیل شکل بر آب شستگی موضعی اطراف آنها

سید مجتبی حسینی متین<sup>۱</sup> ID، محمد بهرامی یاراحمدی<sup>۲</sup> ID✉، مهدی قمشی<sup>۳</sup> ID، محمود شفاعی بجستان<sup>۴</sup> ID

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: mojtabahosseiniमतin1997@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.bahrami@scu.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: ghomeshi@scu.ac.ir

<sup>۴</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m\_shafai@yahoo.com

### چکیده

از علل اصلی خرابی بسیاری از پل‌ها که در رودخانه‌ها احداث می‌شوند آب شستگی موضعی در پیرامون پایه‌های آن‌ها مخصوصاً در مواقع سیلابی است. شکست و تخریب پل‌ها علاوه بر خسارات مالی و جانی، راه ارتباطی به نقاط سیل‌گیر و محتاج کمک‌رسانی را نیز قطع کرده و خسارت‌ها را دوچندان می‌کند. در تحقیق حاضر به بررسی اثر فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیلی قائم در گروه پایه، بر آب شستگی موضعی پیرامون آن‌ها در کانال مستقیم تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت (اعداد فرود ۰/۱۶۰، ۰/۱۸۶، ۰/۲۱۱ و ۰/۲۴۵) پرداخته شده است. پایه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر مستطیل شکل و به عرض ۲/۵ و طول ۳/۵ سانتی‌متر انتخاب شدند. در این تحقیق فاصله طولی بین پایه‌ها ثابت و ۴ برابر عرض پایه (۱۰ سانتی‌متر) و فاصله عرضی بین پایه‌ها ۱، ۳، ۵ و ۸ برابر عرض پایه معادل با ۲/۵، ۷/۵، ۱۲/۵ و ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شد. نتایج نشان داد که با افزایش فاصله عرضی بین پایه‌ها حداکثر عمق آب شستگی ابتدا روند نزولی پیدا کرد و در فاصله سه برابر عرض پایه به حداقل مقدار رسید سپس با افزایش فاصله عرضی حداکثر عمق آب شستگی افزایش یافت و در فاصله ۸ برابر عرض پایه به بیشترین مقدار رسید. حداکثر عمق آب شستگی در فاصله ۸ برابر عرض پایه به‌طور متوسط ۳۴ درصد بیش از فاصله ۳ برابر عرض پایه به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** آب شستگی موضعی، گروه پایه مستطیلی، فاصله عرضی، مهندسی رودخانه

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۹ اسفند ۱۴۰۲ اصلاح: ۰۱ خرداد ۱۴۰۳ پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ تیر ۱۴۰۳

**استناد:** حسینی متین، س.م، بهرامی یاراحمدی، م، قمشی، م، و شفاعی بجستان، م. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی اثر فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیل شکل بر آب شستگی موضعی اطراف آن‌ها، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۲)، ۴۳-۵۸. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10621.1123



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

اهمیت پل در برقراری ارتباط بر کسی پوشیده نیست. وقتی پایه پل در برابر جریان قرار می‌گیرد، در اطراف آن آب شستگی اتفاق می‌افتد. با رسیدن عمق آب شستگی به فونداسیون پایه پل، پایداری آن در معرض خطر قرار می‌گیرد. همه‌ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آب شستگی در اطراف پایه‌های آن‌ها تخریب می‌شوند و این مسئله سال‌هاست که ذهن محققین و مهندسين رودخانه را به خود مشغول کرده است (قدسی و همکاران، ۱۳۹۴، و ولی زاده و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴).

پایه پل به‌صورت مانعی در مقابل جریان عمل می‌کند و الگوی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل هندسی و موقعیت پایه نسبت به امتداد جریان و همچنین تعداد و فواصل پایه‌ها در تغییر وضعیت جریان مؤثر است. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آیند که عملکرد آن‌ها باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آب شستگی نامیده می‌شود. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شوند. یکی برخورد جریان به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه است. برخورد جریان به پایه گرداب نعل اسبی<sup>۲</sup> را شکل داده و جدایی جریان از پایه باعث به‌وجود آمدن گرداب‌های برخاستگی<sup>۳</sup> می‌شوند (پور قاسم‌زاده، ۱۳۹۵).

گرداب نعل اسبی عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه پیرامون پایه به‌ویژه در جلوی آن است. پس از برخورد جریان به پایه، به دلیل توزیع سرعت عمودی جریان که سرعت از بستر به‌طرف سطح آب زیاد می‌شود، توزیع فشار دینامیکی بر روی سطح پایه ایجاد می‌شود. گردابان فشار بر روی پایه از بالا به پائین است. این گردابان فشار باعث ایجاد یک جریان رو به پائین در جلوی پایه می‌شود. برخورد جریان به بستر در جلوی پایه باعث حفر چاله آب شستگی می‌شود. حفره آب شستگی توسط گرداب نعل اسبی آن قدر ادامه می‌یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک نماید (ملویل و ساترلند<sup>۴</sup>، ۱۹۸۸). فرایند آب شستگی در حضور گروه پایه تحت تأثیر مکانیسم‌هایی است که آن را نسبت به تک‌پایه پیچیده‌تر می‌کند. تفاوت موجود باعث تغییر عمق و شکل آب شستگی در اطراف گروه پایه می‌شود. برای پایه‌ای که خود قسمتی از یک گروه پایه است علاوه بر پارامترهای مؤثر در آب شستگی موضعی اطراف پایه منفرد، اثر گروه نیز مهم است.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در گذشته تحقیقات مختلفی در رابطه با آب شستگی پیرامون پایه پل در داخل و خارج از کشور انجام شده است. ژائو و شپارد<sup>۵</sup> (۱۹۹۹) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه برخورد جریان با گروه پایه بر روی عمق آب شستگی پرداختند. فاصله بین پایه‌ها ۳ برابر قطر پایه در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از آن بود که برای زوایای کمتر از ۲۰ درجه، گرداب‌های نعل اسبی عامل اصلی در فرایند آب شستگی هستند و پیشینه عمق آب شستگی در پایه بالادست ایجاد شد. افزون بر این پیشینه عمق آب شستگی در زاویه قرارگیری ۲۵ درجه مشاهده شد. بزکوس و سزمه<sup>۶</sup> (۲۰۱۰) به بررسی اثر زاویه گروه پایه‌های استوانه‌ای با سه قطر مختلف ۲۵، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر بر عمق آب شستگی موضعی در یک کانال مستقیم پرداختند. آن‌ها زاویه پایه‌ها را نسبت به خط قائم ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که عمق آب شستگی اطراف گروه پایه پل کج نسبت به پایه پل عمودی کمتر بود. همچنین عمق آب شستگی در پایه پل دوتایی نسبت به تک‌پایه کاهش پیدا کرد. لانکا و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۲) به‌منظور بررسی اثر فاصله طولی بین پایه‌ها در گروه پایه و همچنین اثر زاویه برخورد جریان با گروه پایه بر حداکثر عمق آب شستگی، آزمایش‌هایی برای یک گروه پایه استوانه‌ای انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که حداکثر عمق آب شستگی، وابسته به فاصله بین پایه‌ها در گروه پایه و همچنین زاویه برخورد جریان به گروه پایه است. معمار و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۸) اثر زاویه برخورد جریان به دوپایه استوانه‌ای پشت سر هم بر عمق آب شستگی اطراف آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بهترین چیدمان پایه‌ها برای پایه‌های پشت سر هم در زاویه

<sup>1</sup> Valizadeh et al

<sup>2</sup> Horseshoe Vortex

<sup>3</sup> Wake Vortex

<sup>4</sup> Melville & Sutherland

<sup>5</sup> Zhao & Sheppard

<sup>6</sup> Bozkus & Cesme

<sup>7</sup> Lança et al

<sup>8</sup> Memar et al

کج ۳۰ درجه رخ می‌دهد. سلطانی کاظمی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) میزان آب شستگی موضعی در اطراف گروه‌های پایه لوزی شکل را با آرایش‌های مختلف تحت تأثیر وجود امواج ایستاده عرضی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که وقوع امواج ایستاده عرضی در اطراف گروه پایه باعث افزایش عمق و حجم آب شستگی در اطراف پایه‌ها می‌شود. سالمی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۳) میزان آب شستگی موضعی اطراف گروه‌های پایه استوانه‌ای را تحت تأثیر امواج ایستاده عرضی بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که وقوع امواج عرضی به‌طور کلی حداکثر عمق آب شستگی موضعی را در اطراف پایه‌ها افزایش می‌دهد که در آن اثر حالت موج دوم بیشتر از حالت موج اول بود. بهشتی و عطائی آشتیانی (۱۳۸۳) اثر فاصله بین پایه‌ها بر حداکثر عمق آب شستگی در گروه پایه ۲×۴ را بررسی کردند. آزمایش‌ها برای فواصل ۰/۲۵، ۰/۵، ۲ و ۴ برابر عرض پایه‌ها انجام شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد اثر متقابل بین پایه‌ها با کاهش فاصله بین پایه‌ها بیشتر می‌شود، به‌طوری‌که برای فواصل کوچک بین پایه‌ها، حداکثر عمق آب شستگی حدود دو برابر مقدار متناظر برای پایه منفرد است و با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آب شستگی کاهش پیدا کرده و مساوی عمق آب شستگی در پایه منفرد است. امینی و اقبال زاده (۱۳۹۱) اثر آرایش گروه پایه‌ها بر عمق آب شستگی در پایه‌های پل را بررسی کردند. در این تحقیق دو حالت بررسی شد. حالت اول اثر آرایش پایه‌ها و فاصله آن‌ها از همدیگر و حالت دوم اثر تعداد ردیف‌های پایه‌ها در حالتی که فاصله آن‌ها ثابت بود، ارزیابی شد. آن‌ها دریافتند که چیدمان گروه پایه‌ها در پایه پل تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر آب شستگی موضعی دارد به‌طوری‌که بیشترین عمق آب شستگی در بالادست گروه پایه‌ها و در اطراف ردیف اول اتفاق می‌افتد. همچنین در این تحقیق نشان داده شد با افزایش تعداد ردیف پایه‌ها تا ۵ برابر قطر پایه در جهت جریان، عمق آب شستگی افزایش می‌یابد. بیشتر از این تعداد ردیف‌ها، تغییرات عمق آب شستگی ناچیز بود. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی اثر فاصله طولی و آرایش پایه‌ها بر روی میزان آب شستگی در گروه پایه‌ها پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش فاصله در همه آرایش‌ها، حجم آب شستگی افزایش یافت. این افزایش تا  $S/D = 3$  (S=فاصله بین پایه‌ها و  $D =$  قطر پایه) مقدار کمی است و تغییرات در  $S/D > 3$  به‌شدت افزایش پیدا کرد. آرایش پایه‌ها و فاصله آن‌ها، مساحت و حجم حفره آب شستگی را تحت تأثیر قرارداد به‌طوری‌که با افزایش فاصله پایه‌ها، عمق آب شستگی، حجم و مساحت حفره آب شستگی افزایش یافت. ظهوری و همکاران (۱۳۹۱) عمق آب شستگی موضعی اطراف گروه پایه دایره‌ای شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که، با افزایش فاصله مرکز به مرکز پایه‌ها ( $G$ ) از  $D$  به  $2.5D$  (= قطر پایه) عمق آب شستگی ماکزیمم که در پایه جلویی ایجاد می‌شود تا ۲۰ درصد افزایش یافت. با افزایش فاصله بین پایه‌ها مقدار عمق آب شستگی در پایه اول کاهش یافته و برای فاصله  $G/D = 5$  تقریباً برابر عمق آب شستگی در حالت  $G/D = 1$  شد. رشنو و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی حداکثر عمق آب شستگی در گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی با چیدمان خطی پرداختند. فاصله بین پایه‌ها از ۲ برابر تا ۱۰ برابر قطر پایه ( $D$ ) و همچنین زاویه برخورد جریان به پایه‌ها از ۰ تا ۹۰ درجه متغیر بود. مدل گروه پایه‌های پل شامل دو پایه و سه‌پایه با مقطع دایره و قطر پایه‌ها برابر ۴ سانتیمتر بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در چیدمان دوپایه، حداکثر عمق آب شستگی اطراف پایه اول و دوم با افزایش فاصله بین پایه‌ها ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. به‌طوریکه حداکثر عمق آب شستگی پایه اول ۱/۱۹ برابر آب شستگی تک‌پایه و در فاصله  $5D$  و همچنین حداکثر عمق آب شستگی پایه دوم ۱/۰۹ برابر آب شستگی تک‌پایه و در فاصله  $4D$  رخ داد. همچنین با افزایش زاویه برخورد جریان از صفر تا ۹۰ درجه، عمق آب شستگی اطراف پایه دوم به میزان ۱۴ درصد افزایش یافت. در چیدمان سه‌پایه، حداکثر عمق آب شستگی اطراف پایه اول و دوم با افزایش فاصله بین پایه‌ها ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش پیدا کرد. به‌طوریکه حداکثر عمق آب شستگی پایه اول ۱/۱۸ برابر آب شستگی تک‌پایه و در فاصله  $4D$  و همچنین حداکثر عمق آب شستگی پایه دوم ۱/۰۷ برابر آب شستگی تک‌پایه و در فاصله  $5D$  رخ داد. حداکثر عمق آب شستگی در اطراف پایه سوم ۰/۸۶ برابر آب شستگی تک‌پایه و در فاصله  $6D$  اتفاق افتاد. اقبال نیک و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی اثر چیدمان متفاوت پایه پل عمودی و کج در گروه پایه‌های ۶ تایی در قوس ۱۸۰ درجه تند پرداختند. در این پژوهش از ۶ پایه استوانه‌ای شکل به قطر ۲ سانتیمتر استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشینه عمق آب شستگی و تراز رسوب‌گذاری در موقعیت ۶۰ درجه و شرایط بستر زنده رخ می‌دهد.

<sup>1</sup> Soltani-Kazemi et al

<sup>2</sup> Salemi et al

در گذشته تحقیقات مختلفی بر روی آب شستگی پیرامون پایه‌های پل و عوامل مؤثر بر آن انجام شده است که اکثر آن‌ها در رابطه با تک‌پایه است. البته تحقیقاتی نیز بر روی گروه پایه‌ها صورت گرفته است که کمتر از تک‌پایه است. در تحقیقات مذکور اکثراً از پایه‌های استوانه‌ای شکل استفاده شده است. در خصوص تأثیر فاصله عرضی بین پایه‌ها در گروه پایه‌ها مخصوصاً پایه‌های به شکل مستطیل، تحقیقات بسیار اندکی انجام شده است. فرضیه نویسندگان تحقیق حاضر این است که تغییرات فاصله عرضی بین پایه‌ها بر میزان آب شستگی پیرامون آن‌ها در گروه پایه‌ها مؤثر است؛ بنابراین هدف از تحقیق حاضر بررسی اثر تغییرات فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیل شکل بر آب شستگی موضعی پیرامون آن‌ها در گروه پایه‌های با آرایش ۲×۲ است.

### روش پژوهش

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلومی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، یک فلوم مستقیم با مقطع مستطیلی است. طول و عرض فلوم به ترتیب برابر ۶ و ۰/۷۳ متر و شیب آن نزدیک به صفر بود. اسکلت فلوم، فلزی و جنس دیواره‌های آن شیشه سکوریت با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بود که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای این‌که تلاطم ناشی از پمپاژ آب در فلوم جلوگیری شود. در ابتدای فلوم یک مخزن آرام‌کننده تعبیه شده است. همچنین به همین منظور در ورودی فلوم نیز صفحه مشبک فلزی و پوشال کولر استفاده شد تا جریان با تلاطم حداقلی وارد فلوم شود. در انتهای فلوم یک سرریز کشویی جهت کنترل و تنظیم عمق جریان تعبیه شده بود که جنس آن از پلکسی‌گلاس با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بود.



شکل ۱. فلوم مورد استفاده در این پژوهش

یک مخزن فلزی با ابعاد ۹۰×۶۰×۵۰ سانتی‌متر در انتهای فلوم و پس از سرریز کشویی قرار داشت. جریان پس از عبور از سرریز کشویی وارد این مخزن می‌شد سپس توسط یک لوله به استخر ذخیره ریخته می‌شد. تأمین آب آزمایشگاه هیدرولیک توسط سه عدد پمپ صورت می‌گرفت. این پمپ‌ها آب را از استخر ذخیره زیرزمینی به درون مخزن بار ثابت پمپاژ می‌کردند. این مخزن برای تأمین فشار ثابت در شبکه آبرسانی آزمایشگاه و دبی ورودی یکنواخت به فلوم، ساخته شده است. جریان پس از مخزن تأمین فشار ثابت و از طریق لوله وارد فلوم می‌شد. دبی سنج مورد استفاده در این تحقیق دبی سنج الکترومغناطیسی مگاب ۳۰۰۰ تولید شرکت ایران‌مدار با دقت اندازه‌گیری ۰/۵ درصد است. برداشت توپوگرافی بستر در هر آزمایش با استفاده از متر لیزری لایکا X310 با دقت ۱ میلی‌متر صورت می‌گرفت. برای این منظور متر لیزری بر روی صفحه‌ای شفاف و مدرج (که بر روی فلوم و در عرض آن مستقر می‌گردید) قرار داده می‌شد. صفحه از جنس پلکسی‌گلاس بوده و توسط متر پارچه‌ای مدرج شده بود. متر لیزری بر روی این صفحه قابلیت حرکت در عرض فلوم جهت برداشت داده‌ها را داشت. رسوبات مورد استفاده در این تحقیق از جنس ماسه با چگالی نسبی ۲/۶۵ بود. اندازه متوسط ذرات رسوبی (d<sub>50</sub>) برابر ۰/۷۳ میلی‌متر انتخاب شد. برای حذف اثر غیریکنواختی رسوبات بر کاهش آب شستگی موضعی مطابق پیشنهاد چپو و ملویل (۱۹۸۷) میزان انحراف معیار هندسی ذرات باید از ۱/۳ کم‌تر باشد. ضریب انحراف استاندارد رسوبات بستر  $(\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}})$  برابر ۱/۲۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده یکنواخت بودن دانه‌بندی رسوبات است. در شکل (۳) منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر ارائه شده است. برای جلوگیری از تأثیر اندازه ذرات بستر بر آب شستگی

موضعی و لذا ایجاد حداکثر عمق آب شستگی بایستی  $20-25 > mw/d_{50}$  (تعداد پایه‌ها در هر ردیف و  $w$  = عرض پایه) (رادکیوی و اتما، ۱۹۸۳). در مطالعه حاضر این نسبت برابر ۶۸ است. رسوبات بستر درون یک باکس (محدوده آزمایش) به طول ۱/۵ متر و ارتفاع ۱۵ سانتیمتر که در وسط فلوم قرار داشت، ریخته شد. فاصله ابتدای باکس از ابتدای فلوم برابر ۲/۲۵ متر بود. بالادست و پایین دست باکس رسوبی، باکس سیمانی به ارتفاع ۱۵ سانتیمتر جهت جلوگیری از شسته شدن تمام رسوبات درون باکس رسوبی ساخته شد. پایه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر مستطیل شکل و به عرض ۲/۵ و طول ۳/۵ سانتی‌متر انتخاب شدند. جنس پایه‌ها از چوب بود. در همه آزمایش‌ها از گروه پایه با آرایش ۲×۲ استفاده شد. فاصله طولی بین پایه‌ها ثابت و ۴ برابر عرض پایه (۱۰ سانتیمتر) در نظر گرفته شد. فاصله عرضی بین پایه‌ها ۱، ۳، ۵ و ۸ برابر عرض پایه معادل با ۲/۵، ۷/۵، ۱۲/۵ و ۲۰ سانتیمتر انتخاب گردید.

در جریان‌های کم عمق طبق نظر اتما (۱۹۸۰)، گرداب‌های موج کمانی ایجاد شده در سطح آب، با جریان تداخل یافته و باعث کاهش در جریان رو به پائین و کاهش عمق آب شستگی می‌شود؛ بنابراین برای اینکه تأثیر این پدیده بر روی عمق آب شستگی از بین برود باید حداقل عمق جریان بیش از ۳ برابر قطر پایه باشد. برای این که زبری بستر روی آب شستگی اثر نگذارد باید عمق جریان بیش از ۲۰ میلی‌متر انتخاب شود. نکته حائز اهمیت دیگر در تعیین عمق جریان، رعایت حداکثر سرعت جریان در شرایط آب زلال است. آب شستگی موضعی به دودسته آب شستگی آب زلال و آب شستگی بستر زنده تقسیم‌بندی می‌شود. در آب شستگی آب زلال حداکثر عمق حفره آب شستگی به علت عدم حرکت رسوبات در بالادست پایه، ایجاد می‌گردد. در آب شستگی بستر زنده به علت حمل رسوب بستر بالادست پایه، حفره آب شستگی از رسوب پر شده و عمق حفره آب شستگی را کاهش می‌دهد. آب شستگی بستر زنده زمانی ایجاد می‌شود که سرعت متوسط جریان ( $V$ ) از سرعت متوسط بحرانی (سرعت آستانه حرکت ذرات) ( $V_c$ ) بیشتر باشد. اگر سرعت متوسط جریان در محدوده باشد ( $0.3V_c < V < V_c$ ) باشد آب شستگی آب زلال ایجاد می‌شود (چیو و ملویل<sup>۲</sup>، ۱۹۹۹). با توجه با مطالب ذکر شده، در این تحقیق عمق جریان ثابت و برابر ۱۴ سانتی‌متر انتخاب شد. در این پژوهش از دبی‌های ۱۹، ۲۲، ۲۵ و ۲۹ لیتر بر ثانیه (اعداد فرود ۰/۱۸۶، ۰/۲۱۱ و ۰/۲۴۵) استفاده شد. نسبت  $V/V_c$  در این مطالعه در همه آزمایش‌ها بین ۰/۶۳ الی ۰/۹۷ بود، لذا کلیه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام گرفته است. با توجه به اینکه ۴ فاصله عرضی برای پایه‌ها در هر گروه پایه در نظر گرفته شد، مجموع آزمایش‌ها برابر ۱۶ عدد است.

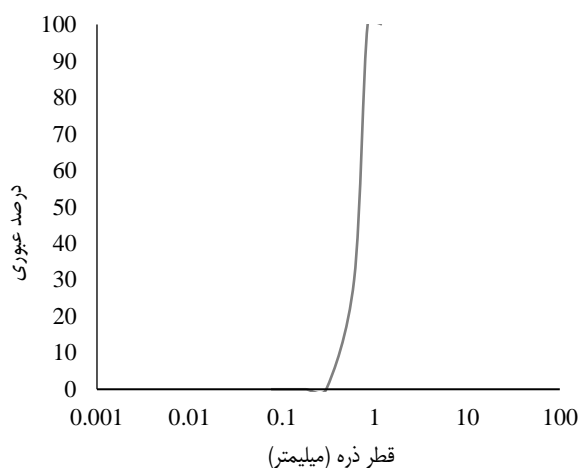
عمق آب شستگی در اطراف پایه پل‌ها، تابع زمان بوده و با گذشت زمان توسعه پیدا کرده و پس از طی مدت زمانی به حالت تعادل می‌رسد. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر هدف بررسی اثر فاصله عرضی بین پایه‌ها بر آب شستگی موضعی پیرامون گروه پایه‌ها بود؛ لذا از یک‌زمان ثابت ۵ ساعته برای تمام آزمایش‌ها استفاده شد.

<sup>1</sup> Raudkivi & Ettema

<sup>2</sup> Chiew & Melville



شکل ۲. نمایی از گروه پایه قبل از شروع آزمایش



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی رسوبات بستر

### شرح انجام آزمایش

قبل از شروع هر آزمایش فاصله عرضی پایه‌ها از یکدیگر تنظیم می‌شد سپس سطح رسوبات بستر کاملاً تراز و تسطیح می‌گردید. برای اطمینان از تراز بودن بستر رسوبی، رقوم بستر در بالادست و پایین دست پایه‌ها و همچنین پیرامون آن‌ها با استفاده از متر لیزری برداشت می‌گردید. این رقوم تراز شده برای بستر در همه آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد. پس از آن اولین گام برای انجام آزمایش بستن سرریز کشویی انتهای فلوم و باز کردن شیرفلکه جریان با دبی کم در حدود ۱ لیتر بر ثانیه بود تا از فرسایش بستر جلوگیری شود. بعد از آنکه عمق آب در فلوم به حدود ۱۰ سانتی‌متر می‌رسید به تدریج دبی افزایش داده می‌شد و این امر باعث افزایش عمق آب در فلوم می‌گردید. پس از تنظیم دبی جریان، با پایین آوردن سرریز کشویی عمق آب در حد ۱۴ سانتی‌متر تنظیم می‌گردید. در این هنگام آزمایش شروع می‌شد. پس از گذشت ۵ ساعت از شروع آزمایش، ابتدا سرریز کشویی انتهای فلوم بالا آورده می‌شد تا عمق آب افزایش و عدد فرود جریان کاهش یابد و توپوگرافی بستر دستخوش تغییر نشود. سپس شیرفلکه جریان کاملاً بسته می‌شد تا جریان وارد فلوم نگردد. در انتهای هر آزمایش پس از زهکشی شدن بستر، توپوگرافی بستر با استفاده از متر لیزری (با دقت ۱ میلی‌متر) برداشت می‌گردید و داده‌های برداشت شده در نرم‌افزار اکسل ذخیره می‌شد.

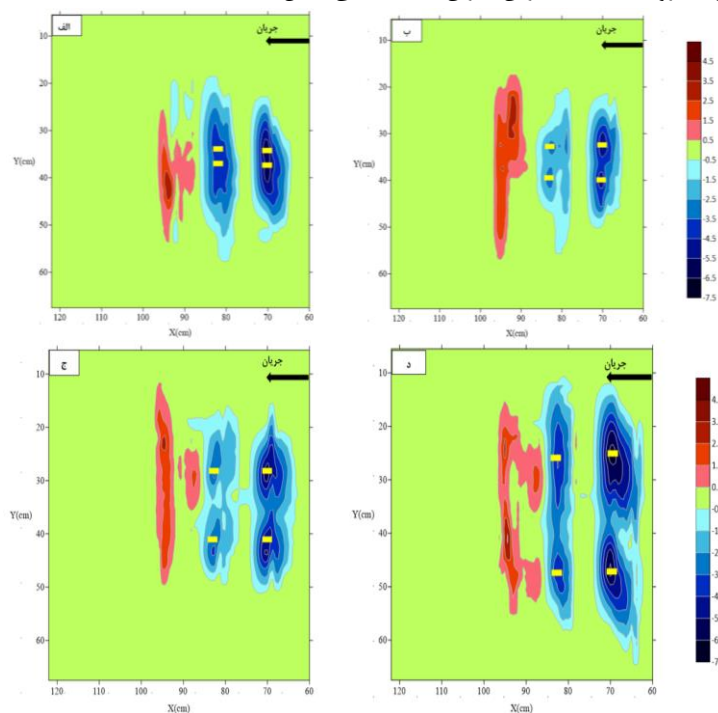


### یافته‌ها

در این بخش از تحقیق نتایج حاصل از تغییر فاصله عرضی گروه پایه‌ها بر میزان آب شستگی موضعی پیرامون آنها تحت شرایط هیدرولیکی مختلف ارائه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

### الگوی آب شستگی و رسوب‌گذاری اطراف گروه پایه‌ها

برای ترسیم الگوی آب شستگی و رسوب‌گذاری پیرامون گروه پایه‌ها از نرم‌افزار Surfer استفاده شد. شکل (۴) الگوی آب شستگی و رسوب‌گذاری اطراف گروه پایه‌ها را در فاصله‌های عرضی ۸ برابر عرض پایه برای اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. با دقت در شکل‌ها ملاحظه می‌کنید که در اطراف هر کدام از پایه‌ها آب شستگی اتفاق افتاده که میزان آب شستگی در این تحقیق تابعی از عدد فرود جریان، میزان فاصله پایه‌ها از یکدیگر و ردیف قرارگیری پایه (ردیف اول یا دوم) است. در این تحقیق با افزایش عدد فرود جریان عمق آب شستگی افزایش یافت که این ناشی از افزایش قدرت گردابه‌های فرساینده و همچنین تنش برشی بستر در پیرامون پایه‌ها است. علاوه بر این آب شستگی دوپایه ردیف اول بیشتر از پایه‌های ردیف دوم است. در واقع عمق آب شستگی در پیرامون پایه‌های ردیف دوم کمتر از پایه‌های ردیف اول است که این امر ناشی از این است که سرعت جریان برخوردکننده به پایه‌های ردیف دوم کمتر از پایه‌های ردیف اول است. جریان پس از عبور از پایه‌های ردیف اول دچار کاهش سرعت می‌شود. جریان پس از برخورد به پایه‌ها به علت تشکیل گردابان فشار به طرف پایین حرکت کرده و پس از برخورد به بستر باعث حفر چاله آب شستگی می‌شود. چاله آن قدر بزرگ می‌شود که جریان پایین‌رونده قدرت فرسایش و حفر بیشتر چاله را نداشته باشد. در اثر تقابل جریان طولی و جریان پایین‌رونده، جریان حلزونی و یا گرداب نعل اسبی در دو طرف پایه شکل می‌گیرد که باعث حفر چاله در طرفین پایه می‌شود. در ضمن رسوبات حاصل از آب شستگی توسط همین جریان حلزونی به طرف پایین دست منتقل می‌شوند. تغییر عدد فرود جریان و فاصله بین پایه‌ها بر روی این سیستم گردابی تأثیر می‌گذارد و لذا باعث تغییر میزان آب شستگی می‌گردد. در آزمایش‌های با فرود  $0.16$  کمترین میزان آب شستگی و در آزمایش با فرود  $0.245$  بیشترین میزان آب شستگی اتفاق افتاد.



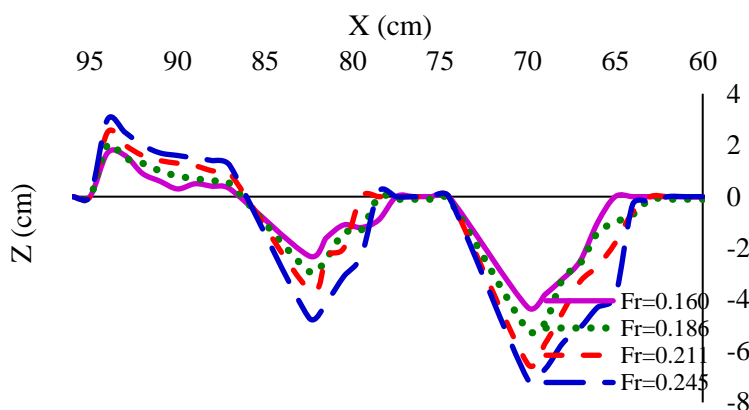
شکل ۴. الگوی آب شستگی و رسوب‌گذاری پیرامون گروه پایه‌ها به ازای عدد فرود  $0.245$  و برای فواصل الف)  $S=1w$  ب)  $S=3w$  ج)  $S=5w$  د)  $S=8w$ .

شکل (۴) نشان می‌دهد که چاله آب شستگی دوپایه ردیف اول به علت یکسان بودن قدرت گردابه‌های نعل اسبی اطراف پایه‌های ردیف اول، متقارن هستند و عمق آن‌ها تقریباً یکسان است. بیشترین میزان آب شستگی در فاصله ۸ برابر عرض پایه اتفاق افتاد. رسوبات حاصل از آب شستگی در پایین دست پایه‌های ردیف دوم ترسیب یافتند. میزان رسوب‌گذاری در فاصله عرضی ۸ برابر عرض پایه که در آن بیشترین میزان آب شستگی اتفاق افتاد بیش از بقیه فواصل بود.

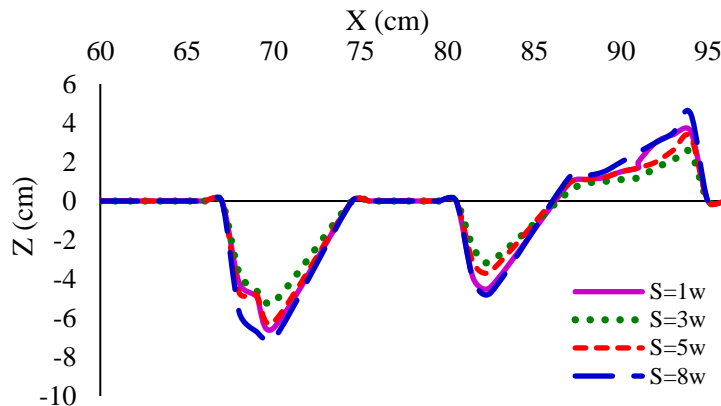
### پروفیل طولی حداکثر عمق آب شستگی

در شکل (۵) روند تغییرات پروفیل طولی حداکثر عمق چاله آب شستگی برای فاصله عرضی ۸ برابر عرض پایه که در آن بیشترین میزان آب شستگی اتفاق افتاد نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در فاصله عرضی ۸ برابر عرض پایه با افزایش عدد فرود جریان، طول و عمق چاله آب شستگی افزایش پیدا کرد که این ناشی از افزایش قدرت گرداب نعل اسبی در پیرامون پایه‌ها و احتمالاً افزایش وسعت گردابه در پیرامون پایه‌ها است. توسعه‌ی طولی چاله‌ها بیان‌گر این است که در تمامی فاصله‌ها با افزایش شدت جریان، چاله‌های آب شستگی اطراف گروه پایه توسعه بیشتری یافته و حداکثر عمق آب شستگی در اطراف پایه‌ها افزایش می‌آید. همان‌گونه که شکل (۵) نشان می‌دهد شیب چاله‌های آب شستگی پایه‌های ردیف جلو و ردیف عقب تقریباً یکسان است ولی عمق چاله آب شستگی پایه‌های ردیف عقب کمتر از پایه‌های ردیف جلو است که این ناشی از کاهش سرعت جریان برخوردکننده به پایه‌های ردیف عقب است.

در شکل (۶) روند تغییرات پروفیل طولی حداکثر عمق چاله آب شستگی برای چهار فاصله مختلف به ازای عدد فرود ۰/۲۴۵ (به عنوان نمونه) نشان داده شده است. در فواصل ۱ و ۳ برابر عرض پایه، به علت نزدیکی دوپایه به یکدیگر، یک چاله آب شستگی در اطراف دوپایه تشکیل شد. چاله آب شستگی در فاصله عرضی ۳ برابر عرض پایه، کمترین میزان عمق آب شستگی را دارا است. با افزایش فاصله عرضی به میزان ۸ برابر عرض پایه بزرگ‌ترین چاله آب شستگی در پیرامون پایه‌های جلویی و به صورت مستقل تشکیل گردید. بیشترین میزان عمق آب شستگی به ترتیب متعلق به فاصله عرضی ۸ برابر، ۱ برابر، ۵ برابر و ۳ برابر عرض پایه است. به طور کلی نتایج نشان داد که در یک فرود ثابت با افزایش فاصله عرضی بین پایه‌ها میزان عمق آب شستگی و همچنین طول چاله آب شستگی و ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین دست پایه‌های عقبی، ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت به طوری که در فاصله ۳ برابر عرض پایه به کمترین مقدار و در فاصله عرضی ۸ برابر عرض پایه به بیشترین مقدار خود رسید.



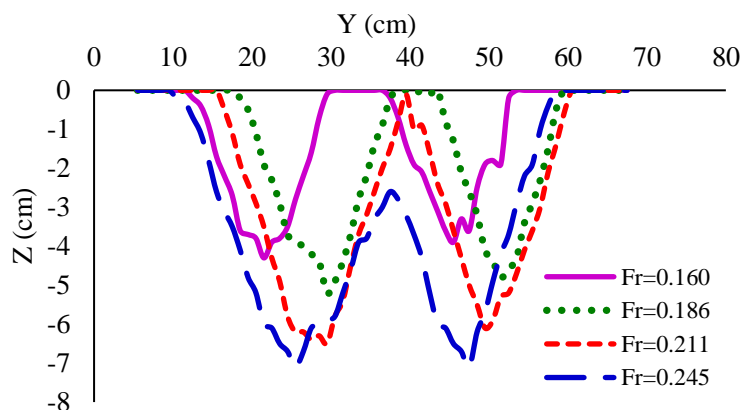
شکل ۵. پروفیل طولی حداکثر عمق چاله آب شستگی برای اعداد فرود مختلف



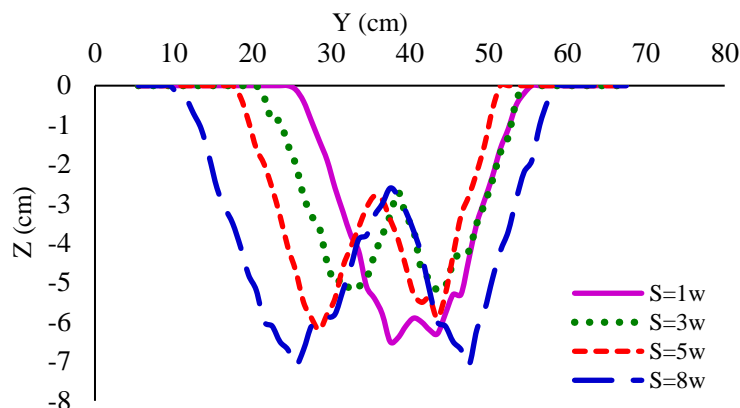
شکل ۶. پروفیل طولی حداکثر عمق چاله آب شستگی برای فواصل مختلف به ازای عدد فرود ۰/۲۴۵

### پروفیل عرضی حداکثر عمق آب شستگی

در شکل‌های (۷) و (۸) پروفیل عرضی حداکثر عمق آب شستگی که مربوط به چاله آب شستگی پایه جلویی است را برای آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهند. با دقت در این شکل‌ها ملاحظه می‌کنید که در هر فاصله دو چاله آب شستگی که مربوط به دوپایه جلویی است، ایجاد شد. در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده، با افزایش عدد فرود جریان عرض و عمق هر چاله آب شستگی افزایش یافته است که این ناشی از افزایش قدرت گرداب نعل اسبی در پیرامون پایه‌ها و احتمالاً افزایش وسعت گردابه در پیرامون آنها است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که در یک عدد فرود ثابت با افزایش فاصله عرضی بین پایه‌ها میزان عمق آب شستگی و همچنین عرض چاله آب شستگی، ابتدا کاهش و سپس افزایش یافت به‌طوری‌که در فاصله ۳ برابر عرض پایه به کمترین مقدار و در فاصله عرضی ۸ برابر عرض پایه به بیشترین مقدار خود رسید. همان‌گونه که شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهند شیب چاله آب شستگی در هر دو چاله یکسان و عمق هر دو چاله تقریباً یکسان است که این نشان می‌دهد میزان سرعت جریان برخورد شونده به هر دوپایه که در یک ردیف قرار دارند یکسان است و میزان قدرت گردابه نعل اسبی در پیرامون هر دوپایه تقریباً برابر است.



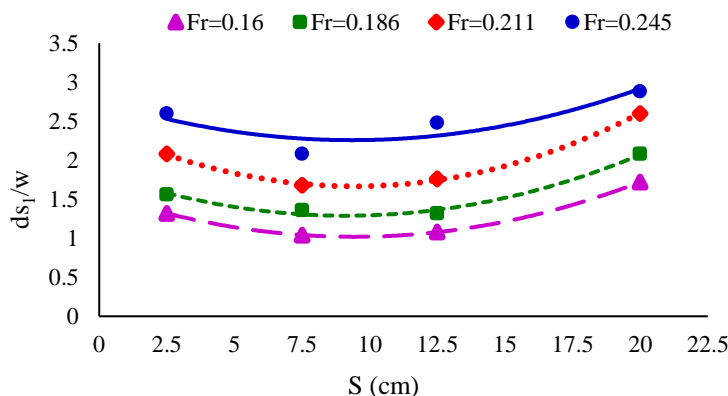
شکل ۷. پروفیل عرضی حداکثر عمق آب شستگی برای فاصله ۸ برابر عرض پایه



شکل ۸. پروفیل عرضی حداکثر عمق آب شستگی برای فواصل مختلف به ازای عدد فرود ۰/۲۴۵

### حداکثر عمق چاله آب شستگی

همان گونه که قبلاً توضیح داده شد، در همه آزمایش‌ها حداکثر عمق چاله آب شستگی در پیرامون پایه‌های ردیف اول اتفاق افتاد. شکل (۹) روند تغییرات حداکثر عمق نسبی آب شستگی ( $ds/w$ ) را به ازای فواصل و اعداد فرود مختلف نشان می‌دهد. با دقت در شکل ملاحظه می‌گردد که با افزایش فاصله عرضی بین پایه‌ها حداکثر عمق آب شستگی ابتدا روند نزولی پیدا کرد و در فاصله سه برابر عرض پایه به حداقل مقدار رسید سپس روند تغییرات حداکثر عمق آب شستگی صعودی شد و در فاصله ۸ برابر عرض پایه به بیشترین مقدار رسید. محاسبات نشان داد که حداکثر عمق آب شستگی در فاصله ۸ برابر عرض پایه در اعداد فرود ۰/۱۶، ۰/۱۸۶، ۰/۲۱۱ و ۰/۲۴۵ به ترتیب ۳۹/۵، ۳۵، ۳۸ و ۳۵ درصد بیش از فاصله ۳ برابر عرض پایه و به ترتیب ۳۷، ۳۲ و ۱۴ درصد بیش از فاصله ۵ برابر عرض پایه و به ترتیب ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۱۰ درصد بیش از فاصله ۱ برابر عرض پایه بود. علاوه بر این حداکثر عمق آب شستگی در فاصله ۱ برابر عرض پایه در اعداد فرود ۰/۱۶، ۰/۱۸۶، ۰/۲۱۱ و ۰/۲۴۵ به ترتیب ۲۱، ۱۳، ۱۹ و ۲۰ درصد بیش از فاصله ۳ برابر عرض پایه محاسبه شد. در ضمن حداکثر عمق آب شستگی در فاصله ۵ برابر عرض پایه در اعداد فرود ۰/۱۶، ۰/۱۸۶، ۰/۲۱۱ و ۰/۲۴۵ به ترتیب ۴، ۳، ۵ و ۱۶ درصد بیش از فاصله ۳ برابر عرض پایه است. شکل (۹) نشان می‌دهد که در همه فواصل با افزایش عدد فرود جریان، به علت افزایش سرعت و در نتیجه تنش برشی جریان و همچنین افزایش قدرت گردابه‌های نعل اسبی، حداکثر عمق آب شستگی افزایش یافت. بررسی‌ها نشان داد که در فاصله عرضی ۸ برابر عرض پایه، حداکثر عمق آب شستگی در عدد فرود ۰/۱۸۶ به میزان ۱/۲۰ برابر عدد فرود ۰/۱۶، در عدد فرود ۰/۲۱۱ به میزان ۱/۲۵ برابر عدد فرود ۰/۱۸۶ و در عدد فرود ۰/۲۴۵ به میزان ۱/۱۰ برابر عدد فرود ۰/۲۱۱ بود. در فاصله عرضی ۱ برابر عرض پایه حداکثر عمق آب شستگی از عدد فرود ۰/۱۶۰ به ۰/۱۸۶ به اندازه ۱/۱۸ برابر، از عدد فرود ۰/۱۸۶ به ۰/۲۱۱ به اندازه ۱/۳۳ برابر و از عدد فرود ۰/۲۱۱ به ۰/۲۴۵ به میزان ۱/۲۵ برابر بود. در فاصله عرضی ۵ برابر عرض پایه، حداکثر عمق آب شستگی از عدد فرود ۰/۱۶ به ۰/۱۸۶ به اندازه ۱/۲۲ برابر، از عدد فرود ۰/۱۸۶ به ۰/۲۱۱ به اندازه ۱/۳۳ برابر و از عدد فرود ۰/۲۱۱ به ۰/۲۴۵ به اندازه ۱/۴۰ برابر افزایش پیدا کرد. در فاصله عرضی ۳ برابر عرض پایه، حداکثر عمق آب شستگی در عدد فرود ۰/۱۸۶ به میزان ۱/۳۰ برابر عدد فرود ۰/۱۶، در عدد فرود ۰/۲۱۱ به میزان ۱/۲۳ برابر عدد فرود ۰/۱۸۶ و در عدد فرود ۰/۲۴۵ به میزان ۱/۲۴ برابر عدد فرود ۰/۲۱۱ محاسبه شد.



شکل ۹. تغییرات حداکثر عمق آب شستگی نسبت به فاصله عرضی بین پایه‌ها

### مقایسه حداکثر عمق آب شستگی اطراف پایه‌های جلویی و عقبی

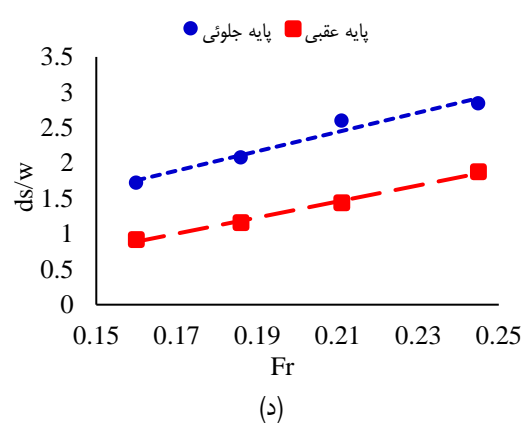
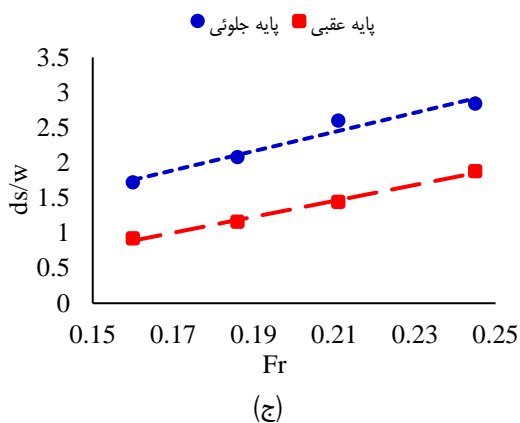
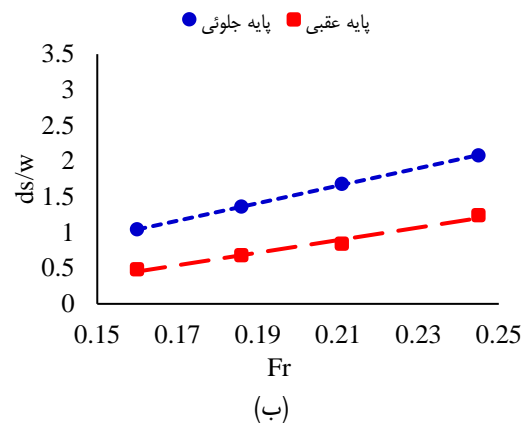
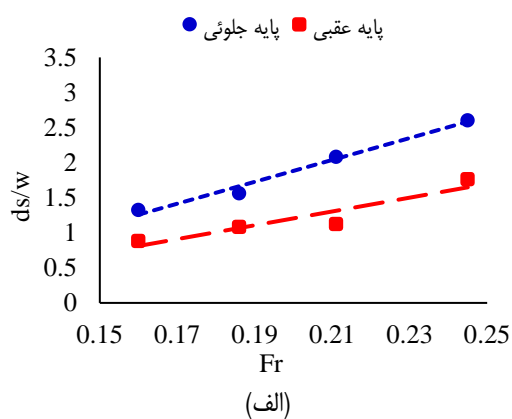
در شکل (۱۰) حداکثر عمق نسبی آب شستگی پیرامون پایه‌های جلویی و عقبی در همه فواصل با یکدیگر مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان داد که در همه آزمایش‌ها حداکثر عمق آب شستگی پیرامون پایه‌های ردیف اول بزرگ‌تر از پایه‌های ردیف دوم بود. عاملی که سبب می‌شود عمق آب شستگی پایه عقبی کمتر از جلویی باشد، عامل محافظت‌کننده است. پایه جلویی مانند محافظ جلوی پایه‌های پشتی قرار گرفته است و باعث کاهش سرعت مؤثر جریان برخوردکننده به پایه پشتی و کم‌تر شدن قدرت گرداب‌های نعل اسبی می‌شود؛ بنابراین عمق آب شستگی در پایه پشتی کم می‌شود. در این شرایط گفته می‌شود که پایه پشتی تحت تأثیر عامل محافظت‌کننده پایه جلویی قرار دارد. محاسبات نشان داد که حداکثر عمق آب شستگی پیرامون پایه‌های ردیف دوم در فواصل عرضی ۱، ۳، ۵ و ۸ برابر عرض پایه به‌طور متوسط به ترتیب ۳۵، ۴۸، ۴۰ و ۴۲ درصد کمتر از پایه‌های ردیف اول است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد میزان کاهش عمق آب شستگی پایه‌های عقبی نسبت به پایه‌های جلویی در همه فواصل یکسان و به‌طور متوسط برابر ۴۱ درصد است.

### بحث

در این تحقیق به بررسی اثر فاصله عرضی بین پایه‌های مستطیل شکل در گروه پایه با آرایش ۲×۲ بر آب شستگی موضعی پیرامون پایه‌ها به ازای شرایط هیدرولیکی مختلف پرداخته شده است. فاصله طولی بین پایه‌ها ثابت (۴ برابر عرض پایه) و فاصله عرضی بین پایه‌ها ۱، ۳، ۵ و ۸ برابر عرض پایه معادل با ۲/۵، ۷/۵، ۱۲/۵ و ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها تحت شرایط آب زلال انجام شدند.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها عمق آب شستگی ابتدا روند نزولی پیدا کرد و در فاصله ۳ برابر عرض پایه به حداقل مقدار رسید و با افزایش فاصله روند آن صعودی شد و در فاصله ۸ برابر عرض پایه به بیشترین مقدار خود رسید. به‌طور کلی بیشترین و کمترین میزان آب شستگی به ترتیب در فواصل ۳ و ۸ برابر عرض پایه رخ داد. چنین نتیجه‌ای علاوه بر عمق برای طول و عرض چاله آب شستگی نیز مشاهده شد یعنی بیشترین طول و عرض چاله آب شستگی در فاصله ۸ برابر عرض پایه مشاهده شد. محاسبات نشان داد که حداکثر عمق آب شستگی در فاصله ۸ برابر عرض پایه به‌طور متوسط به ترتیب ۳۴، ۳۰ و ۲۱ درصد بیش از فواصل ۳، ۵ و ۱ برابر عرض پایه است. علاوه بر این نتایج نشان داد که عمق آب شستگی پایه‌های عقبی کمتر از پایه‌های جلویی است. محاسبات نشان داد که حداکثر عمق آب شستگی پیرامون پایه‌های عقبی در فواصل عرضی ۱، ۳، ۵ و ۸ برابر عرض پایه به‌طور متوسط به ترتیب ۳۵، ۴۸، ۴۰ و ۴۲ درصد کمتر از پایه‌های جلویی است.



شکل ۱۰. مقایسه حداکثر عمق آب شستگی پایه‌های جلوئی و عقبی برای فواصل الف)  $S=1w$ ، ب)  $S=3w$ ، ج)  $S=5w$ ، د)  $S=8w$

### تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدین‌وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود (SCU.WH1402.31373).

### منابع

- اظه‌ری، امیر، تقی پور، رضا، و علیزاده، محمد. (۱۳۹۱). آبشستگی موضعی پیرامون گروه پایه پل: بررسی اثر زاویه قوس کانال و فاصله بین پایه ها. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. <https://civilica.com/doc/186261>
- اقبال نیک، لیلا، واقفی، محمد، و گلپهار حقیقی، محمد رضا. (۱۳۹۸). تأثیر شرایط جریان بر ابعاد حفره آبشستگی اطراف گروه پایه‌های پل ۶ تایی کچ و عمود بر جهت جریان در کانال قوسی ۱۸۰ درجه. مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس، ۱۹(۴)، ۱-۱۶. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-28029-fa.html>
- امینی، عطا، و اقبال زاده، افشین. (۱۳۹۱). بررسی آزمایشگاهی اثر آرایش گروه شمع ها بر عمق آبشستگی در پایه های پل. مجله پژوهش آب ایران، ۱۱(۱)، ۹۵-۱۰۳. [https://iwrj.sku.ac.ir/article\\_10907.html](https://iwrj.sku.ac.ir/article_10907.html)

- بهشتی، علی اصغر، و عطائی‌آشتیانی، بهزاد. (۱۳۸۳). آبشستگی در شرایط آب صاف در اطراف گروه پایه. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.
- پور قاسم‌زاده، بهنام. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه گروه پایه‌های استوانه‌ای پل نسبت به جهت جریان بر روی حداکثر عمق آبشستگی گروه پایه‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- رشنو، عماد، زراتی، امیر رضا، و کریمایی طبرستانی، مجتبی. (۱۳۹۵). مطالعه آزمایشگاهی پدیده آبشستگی موضعی در اطراف گروه پایه پل. پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران، ۳(۶)، ۱۵۴-۱۴۳. [https://journals.sru.ac.ir/article\\_800.html](https://journals.sru.ac.ir/article_800.html)
- سلیمانی، نینا، امینی، عطا، و بانژاد، حسین. (۱۳۹۴). بررسی مکانیسم آبشستگی در پایه پل منفرد و گروه پایه‌های پل. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. <https://civilica.com/doc/364681>
- قدسی، حبیب، خانجانی، محمد جواد، و بهشتی، علی اصغر. (۱۳۹۴). بررسی آزمایشگاهی آبشستگی خاک حول پایه‌های مرکب پل. نشریه پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران، ۲(۳)، ۴۷-۵۵. [https://journals.sru.ac.ir/article\\_337.html](https://journals.sru.ac.ir/article_337.html)

## References

- Amini, A., & Eghbalzadeh, A. (2012). Effect of pile arrangement on local scour depth at pile groups. *Iranian Water Researches Journal*, 6(2), 95-103. [https://iwrij.sku.ac.ir/article\\_10907.html](https://iwrij.sku.ac.ir/article_10907.html) [In Persian]
- Azhari, A., Taghipour, R., & Alizadeh, M. (2012). Local scouring around the pier group of the bridge: investigation of the effect of the arch angle of the channel and the distance between the piers. 11th Iranian Hydraulic Conference, Urmia University, Urmia, Iran. <https://civilica.com/doc/186261> [In Persian]
- Beheshti, A. A., & Atai Ashtiani, B. (2004). Scouring in clear water conditions around the pier group. 1st National Congress on Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. [In Persian]
- Bozkus, Z., & Cesme, M. (2010). Reduction of scouring depth by using inclined piers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(12), 1621-1630. <https://doi.org/10.1139/L10-09>
- Chiew, Y. M., & Melville, B. W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26. <https://doi.org/10.1080/00221688709499285>
- Eghbalnik, L., Vaghefi, M., & Golbahar Haghghi, M. R. (2019). The effect of flow conditions on bed topography in a 180 degree bend containing sextuple inclined-vertical pier groups in a perpendicular to the flow. *MCEJ*, 19 (4), 1-16. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-28029-fa.html> [In Persian]
- Ettema, R. (1980). Scour at Bridge Piers. Rep. No 216, Unniversity of Aukland, School of Engineering.
- Ghodsi, H., Khanjani, M., & Beheshti, A. A. (2015). Experimental investigation of local scour around a complex bridge pier. *Experimental Research in Civil Engineering*, 2(3), 47-55. [https://journals.sru.ac.ir/article\\_337.html](https://journals.sru.ac.ir/article_337.html) [In Persian]
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, R. & Cardoso, A. H. (2012). Effect of spacing and skew angle on clear-water scour at pier alignments. *Proceedings of River Flow*, Muñoz, R. (editor), 927 - 933. <https://www.researchgate.net/publication/273761582>
- Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:10\(1210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210))
- Memar, S., Zounemat-Kermani, M., Beheshti, A. A., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2018). Investigation of local scour around tandem piers for different skew-angles. *E3S Web of Conferences* 40, 03008. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20184003008>

- Pour Ghasemzadeh, B. (2016). Experimental study of the effect of the angle of the cylindrical pier group relative to the flow direction on the maximum scour depth of the pier group. Master's thesis, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. [In Persian]
- Rashno, E., Zarrati, A., & Karimaei Tabarestani, M. (2016). Experimental investigation of local scour around bridge pier group. *Experimental Research in Civil Engineering*, 3(6), 143-154. [https://journals.sru.ac.ir/article\\_800.html](https://journals.sru.ac.ir/article_800.html) [In Persian]
- Raudkivi, A. J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))
- Salemi, F., Ghomeshi, M., & Bahrami Yarahmadi, M. (2023). Experimental study of transverse waves effects by obstacles on local scour around cylindrical pier groups of bridge. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01041-w>
- Soleimani, N., Amini, A., & Banjad, H. (2015). Investigating scouring mechanism in single bridge pier and bridge pier group. 10th International Congress on Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran. <https://civilica.com/doc/364681> [In Persian]
- Soltani-Kazemi, Z., Ghomeshi, M., & Bahrami Yarahmadi, M. (2022). Experimental study of local scour around diamond bridge piers subject to transverse standing waves. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101598. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.09.025>
- Valizadeh, R., Arman, A., & Ghobadian, R. (2023). The effect of the pipe angle and protective inclined apron on the scouring and sedimentation pattern around a semi-buried pipe in a 90° mild bend. *Ocean Engineering*, 286(3). <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4460395>
- Valizadeh, R., Arman, A., & Ghobadian, R. (2024). Controlling the local scouring of the bottom of the protective inclined apron in a 90-degree mild bend using a numerical model. *Ocean Engineering*, 307, 118177. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118177>
- Zhao, G., & Sheppard, D. M. (1999). The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups. *Stream Stability and Scour at Highway Bridges; Compilation of Conference Papers*, Reston (U.S.): ASCE. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Effect-of-Flow-Skew-Angle-on-Sediment-Scour-Zhao-Sheppard/561481a31a6d101ec986aded176b041fcc3df44b>